

This is the author version of an article published as:

Mejias, Luis and Mondragon, Ivan and Correa, Juan F. and Campoy, Pascual (2007) Multipurpose control architecture for visual control of a robotic helicopter-COLIBRI. In Proceedings Workshop in Control Architectures for Robots, Madrid, Spain.

Copyright 2007 (please consult author)

Accessed from <http://eprints.qut.edu.au>

Estructura de Control Multi-Propósito con Visión. Aplicación al Control ServoVisual de un Helicóptero Autónomo-COLIBRI

Luis Mejías,
Grupo de Visión por Computador
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, España
lmejias@etsii.upm.es

Pascual Campoy
Iván Mondragón y Juan F. Correa
Grupo de Visión por Computador
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, España
{campoy,imondragon,jfcorrea}@etsii.upm.es

Resumen

En los años recientes los vehículos aéreos autónomos han despertado un gran interés en la sociedad en todos los ámbitos. Sus características y capacidades para realizar determinadas tareas evitando la intervención del humano, que en muchos casos resulta ser riesgosa, lo sitúan como una plataforma ideal para tareas de inspección y vigilancia. El uso de sensores visuales en robots aéreos para realizar tareas como evasión de obstáculos, seguimiento de objetivos o detección de características salientes, permite a tales robots servir de visores inteligentes para aplicaciones de inspección, patrullaje y monitoreo, reconstrucción digital aérea, etc. Más aún, el uso de la visión por computador puede reducir la incertidumbre e incrementar la versatilidad y desempeño general cuando se realizan tareas robotizadas. Este trabajo presenta una estructura de control diseñada para ser integrada en un entorno visual donde múltiples agentes pueden actuar simultáneamente. Procesos de diferente índole, p.e, visión, estación de control, joystick, etc, pueden influir en el control de vuelo y la vez comunicarse e influir en otros procesos. El trabajo hace referencia a diferentes pruebas experimentales donde se ha validado el esquema presentado.

Palabras Clave: control visual, helicóptero autónomo, navegación basada en visión, detección y seguimiento visual.

1 INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos autónomos (UAV, de sus siglas inglesas Unmanned Aerial Vehicles. Nomenclatura internacional adoptada en el presente documento) han sido un área de investigación muy activa durante los últimos años. El uso de UAV en aplicaciones

civiles de patrullaje y monitoreo continúa en crecimiento debido en parte por la evolución y reducción en el coste de los sistemas visión. La visión para el control de un UAV implica realizar investigación en diversos campos como la detección y seguimiento de objetos, estimación de posición, fusión sensorial con GPS y medidas inerciales, y modelado y control de sistemas multivariados no lineales. Un helicóptero autónomo posee propiedades que lo hacen la plataforma idónea para tareas de inspección y monitoreo. Su inherente habilidad de volar a baja velocidad, estacionariamente, lateralmente y realizar maniobras en espacios reducidos lo hacen la plataforma adecuada para tales tareas.



Figura 1: Plataforma aérea COLIBRI durante prueba experimental con líneas eléctricas.

La plataforma aérea presentada [COLIBRI] (figura 1) combina técnicas de visión por computador con un control de bajo nivel para lograr el control visual de un UAV por medio del seguimiento visual de características en la imagen. El sistema de visión actúa como un controlador de alto nivel enviando

consignas de velocidad al control de vuelo, el cual es responsable de un control robusto y estable. El resultado es un algoritmo de seguimiento visual de características que controla los desplazamientos de un helicóptero autónomo en espacios exteriores.

2 TRABAJOS RELACIONADOS

El estudio de los helicópteros autónomos tiene su origen décadas atrás. El modelado dinámico ha sido ampliamente documentado, en particular en [24], [11] donde se presenta un estudio en detalle sobre el modelo aerodinámico y análisis de estabilidad. Dada la inestabilidad propia de los helicópteros los primeros trabajos de investigación se enfocaron en el diseño de controladores estables. En [30] se documenta el diseño de un control retroalimentado robusto basado en Hinf, al igual en [28] se presenta un control Fuzzy para un Yamaha R-50.

Entre los primeros sistemas documentados de navegación para helicópteros autónomos se encuentra [6]. Este sistema presentaba la particularidad de solo usar GPS como sensor principal para la navegación sustituyendo a la Unidad de Medida Inercial (IMU), la cual históricamente se había usado como sensor principal. Este sistema estaba dotado de un GPS que consistía de un oscilador principal y 4 receptores (usando desplazamiento en fase) con 4 antenas colocadas en puntos estratégicos sobre el helicóptero con lo que se conseguía su posición, velocidad, actitud e información angular. El helicóptero descrito en [22] posee una arquitectura jerárquica de módulos de control. Módulos de bajo nivel se encargan de tareas reflexivas, de rápida respuesta como control de bajo nivel, mientras los módulos de alto nivel se encargan de tareas de planificación y navegación. El control se ha diseñado con leyes de control lineal usando controladores PID. Entre los sensores que posee están GPS, IMU, Magnetómetro, Sonar, etc.

En [27] se presenta un sistema de control jerárquico usado en el helicóptero: Berkeley AeRobot project (BEAR) [4]. La identificación del sistema se usa para generar el modelo del helicóptero, y basándose en este modelo se diseñan las leyes de estabilización. El controlador consta de 3 lazos: 1) un lazo interno de control de actitud, 2) un lazo intermedio de control de velocidad, y 3) un lazo externo de control de posición. Las redes neuronales también han servido para diseño e implementación de controladores de vuelo, siendo el Instituto Tecnológico de Georgia [29] el que mas aportes ha hecho en esta técnica. Entre los trabajos mas importantes de este grupo se encuentran [12], [13], [14] y [23]. Recientes logros en el control y modelado han permitido extender las capacidades de vuelo, llegando a realizar maniobras acrobáticas. Un ejemplo de este sistema es el helicóptero descrito en [7] y [8].

Al hacer referencia al control visual, y en especial al de vehículos autónomos aéreos, se hace referencia al uso de la información visual del procesamiento de imágenes para el control de velocidad, posición absoluta o relativa, o para el control de la orientación de un robot aéreo. Al igual que la literatura sobre control visual contempla el termino cámara-en-mano para ciertas configuraciones en robots articulados, la misma puede usarse para el caso de robots aéreos [15]. Uno de los primeros helicópteros autónomos guiados por visión se describe en [3]. Este vehiculo combina las lecturas GPS con un sistema de visión, con la finalidad aumentar la precisión de la estimación de estado para la navegación. El sistema de visión consiste de un procesador DSP que proporciona medidas de posición, velocidad y actitud a frecuencias del orden de 10ms, que combinado con las lecturas del GPS y IMU aumenta la precisión en la estimación de la actitud y la posición del helicóptero.

El control visual también se ha aplicado a vehículos en miniatura, en el caso de un helicóptero (HMX-4) de cuatro rotores [1], [2] donde la visión se usa para determinar la disposición del helicóptero y para la detección de objetos en tierra. En el caso de aviones en miniatura [5] la detección y localización del horizonte se usa para el control lateral de un mini UAV. En el área del aterrizaje autónomo basado en visión, recientemente en [21] la detección de un patrón conocido usando visión por computador y la fusión de esta información con las medidas inerciales permite aterrizar este helicóptero en caso de no disponibilidad de GPS. En [10] técnicas de visión por computador son usadas para recobrar y detectar aquellas áreas seguras para aterrizaje en terrenos desconocidos. Anteriormente, la visión artificial se uso para aterrizar autónomamente un helicóptero usando dos estrategias diferentes [25] y [26], pero con la particularidad de ser la visión por computador la fuente principal de información.

En el caso de la navegación 3D basada en visión Habrar [9] propone una técnica de evasión de obstáculos basada en visión por computador combinando flujo óptico y visión estereoscópica. Experimentos demuestran las ventajas de combinar ambas técnicas, las cuales a su vez combinadas con un planificador de trayectorias basado en mapas probabilísticas permite la navegación de un helicóptero autónomo en entornos urbanos.

3 CONTROL DE VUELO

El control de vuelo de la plataforma COLIBRI esta compuesto por varios lazos de control en cascada para controlar la actitud, velocidad y posición. Cada controlador genera las referencias al controlador

Los diferentes lazos de control mencionados anteriormente leen el estado de las variables del estimador de estado y estabilizan el helicóptero en un punto de operación basándose en controladores PID desacoplados. La maniobrabilidad del vehículo

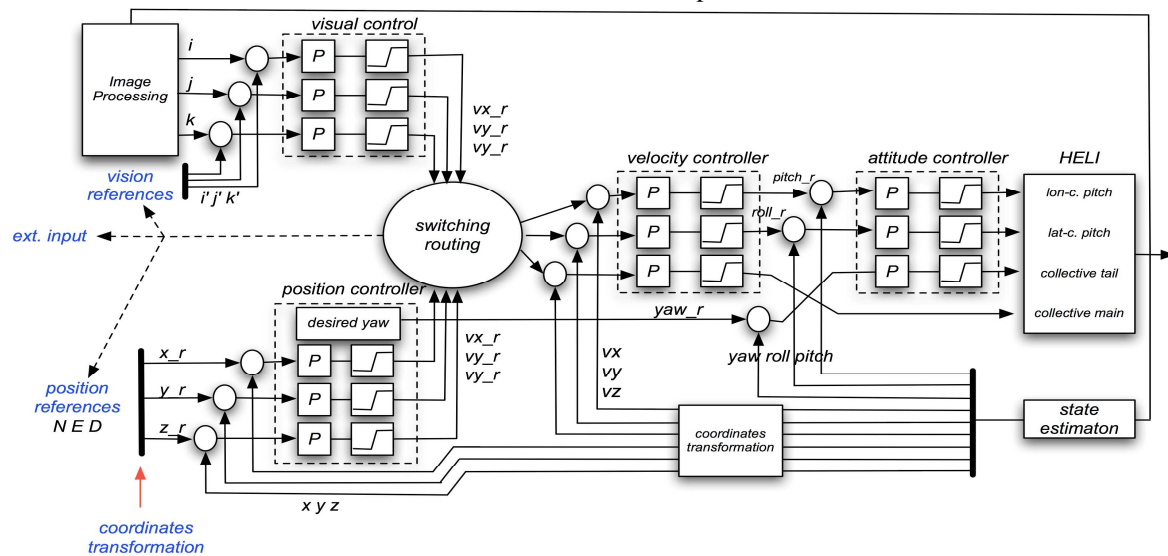


Figura 2: Diagrama esquemático del control de Vuelo

autónomo considerado, el helicóptero, puede ser controlada modificando los ángulos de actitud, es decir, actuando sobre el roll, pitch y yaw. El control de actitud lee los valores de roll, pitch y yaw, y genera las consignas necesarias para estabilizar la actitud del helicóptero. El control del roll y pitch se lleva a cabo mediante dos controladores PD, el control del yaw se hace mediante un controlador PID. La ecuaciones que rigen el control de actitud se muestran a continuación:

$$\delta_{lat} = K_p (\phi_d - \phi) + K_d \frac{\partial}{\partial t} (\phi_d - \phi) \quad (1)$$

$$\delta_{lon} = K_p (\theta_d - \theta) + K_d \frac{\partial}{\partial t} (\theta_d - \theta) \quad (2)$$

$$\delta_t = K_p (\varphi_d - \varphi) + K_i \int (\varphi_d - \varphi) dt + K_d \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_d - \varphi) \quad (3)$$

donde: δ_{lat} , δ_{lon} y δ_t son los comandos de pitch cíclico latitudinal, pitch cíclico longitudinal y colectivo de rotor de cola, respectivamente. Los valores de K_p , K_i and K_d las ganancias proporcional, integral y derivativa asociadas a cada controlador. El control de velocidad, el cual genera referencias de roll, pitch (al control de actitud) y colectivo de rotor principal, esta implementado mediante un control PI.

El controlador lee los valores de velocidad del estimador de estado y genera: ϕ_d y θ_d al control de actitud lo que desplaza el vehículo lateral y longitudinalmente a una velocidad dada, respectivamente. La velocidad vertical que se controla actuando sobre el colectivo de rotor principal, se puede modificar por medio del control de velocidad o posición dependiendo del modo de operación. Cuando el vehículo se mueve hacia una coordenada GPS dada, el control de posición genera consignas de colectivo principal basándose en la altura actual y la deseada. Cuando se esta en vuelo estacionario o se opera en modo velocidad, el control de velocidad es capaz de recibir referencias externas generando consignas de colectivo principal directamente. Este modo de operación es particularmente útil cuando se realiza control visual.

$$\phi_d = vx_r = K_p(vx_d - vx) + K_i \int (vx_d - vx) \partial t (4)$$

$$\theta_d = vy_r = K_p(vy_d - vy) + K_i \int (vy_d - vy) \partial t (5)$$

$$\delta_m = K_p(vz_d - vz) + K_i \int (vz_d - vz) \partial t (6)$$

donde: $v_{x_r}, v_{y_r}, \delta_m$ son la referencias de velocidad longitudinal, velocidad latitudinal y colectivo de

rotor principal, respectivamente. Los valores de K_p y K_i son las ganancias proporcional e integral asociadas a cada controlador. Como se mencionó anteriormente en la configuración de control en cascada cada controlador genera los setpoints (referencias) al controlador siguiente, por esta razón las ecuaciones 4 y 5 son los valores deseados de entrada al controlador de actitud, mientras que la ecuación 6 es el valor del comando de colectivo del rotor principal. El control de posición se implementa mediante un controlador PID. Cuando se vuela en dirección a una coordenada dada o se esta en vuelo estacionario, el controlador lee las coordenadas GPS deseadas y la actual, y genera las referencias de velocidad al control de velocidad del vehiculo y colectivo de rotor principal.

$$vx_d = K_p(x_d - x) + K_i \int (x_d - x) dt + K_d \frac{\partial}{\partial t} (x_d - x) (7)$$

$$vy_d = K_p(y_d - y) + K_i \int (y_d - y) dt + K_d \frac{\partial}{\partial t} (y_d - y) (8)$$

$$vz_d = K_p(z_d - z) + K_i \int (z_d - z) dt + K_d \frac{\partial}{\partial t} (z_d - z) (9)$$

De manera similar, al control de velocidad el control de posición genera las referencias al controlador siguiente. El controlador enseguida es el de velocidad, por esta razón la ecuaciones 7, 8 y 9 se pueden escribir como las referencias de velocidad. Sin embargo, dependiendo del modo de operación el control de posición puede generar directamente la consigna de pitch colectivo de rotor principal influyendo sobre la altitud del helicóptero.

El diseño del control de vuelo ha sido concebido para ser integrado con procesos externos a través de una capa de alto nivel que sirve de enrutamiento. A continuación se describe esta capa y sus principales características.

4 CAPA DE INTERCONEXIÓN PARA INTEGRACIÓN CON REFERENCIAS VISUALES

La integración de la visión por computador en el control de vuelo implica otros campos de investigación como la detección y seguimiento de patrones, estimación de posición por flujo óptico, navegación inercial, GPS, modelado no lineal, etc. Durante el procesamiento de imágenes, al realizarse la detección y seguimiento en el plano de la imagen, las referencias mas apropiadas que puede generar esta etapa son de velocidad en el plano de la imagen, lo que representa a su vez las referencias de velocidad al control de vuelo en el sistema de coordenadas del helicóptero.

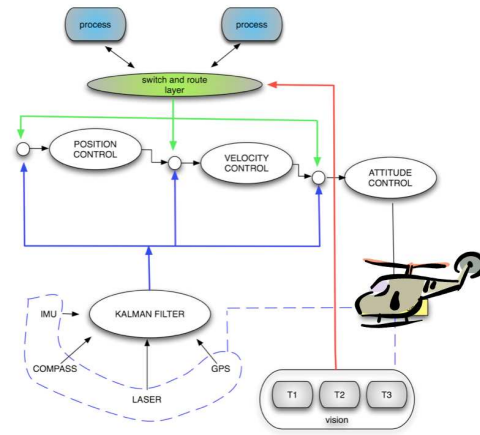


Figura 3: A un alto nivel la estructura del control de vuelo. La visión se integra como un proceso desacoplado.

La configuración actual propuesta (figura 3) del sistema es desacoplado y basado en imagen, es decir, la señal de error a corregir es la posición de la característica en la imagen. En la mayor para de las aplicaciones derivadas de esta propuesta, la visión se usa para alinear el UAV con el objeto de interés usando referencias de velocidad en el plano de la imagen, por lo que la convergencia de esta señal a cero valida la configuración propuesta.

4.1. Capa de interconexión entre Procesos

Esta capa hace uso de una arquitectura conocida como es la cliente-servidor. Esta arquitectura esta basada en mensajes TCP/UDP y esta orientada a que los procesos embebidos se ejecuten a bordo del vehiculo. Procesos de diferente naturaleza (figura 6) se integran con el control de vuelo mediante mensajes, a través de una capa de software definida por una API de comunicaciones. Esta capa permite la interconexión de diferentes procesos externos simultáneamente. El esquema propuesto tiene la ventaja de ser enormemente flexible, dado que varios procesos externos pueden inter-actuar entre ellos y con el control de vuelo a través de la capa de conexión, véase figura 4. En el caso del uso de la visión por computador para el control visual, dicha flexibilidad viene del hecho de que varios sub-procesos de visión, y entiéndase por sub-procesos como, algoritmos dedicados a tareas y/o aplicaciones específicas, pueden inter-actuar a la vez. En el caso de requerir algoritmos de propósito especial, el esquema sigue siendo válido ya que solo requerirá el cambio interno del proceso de visión.

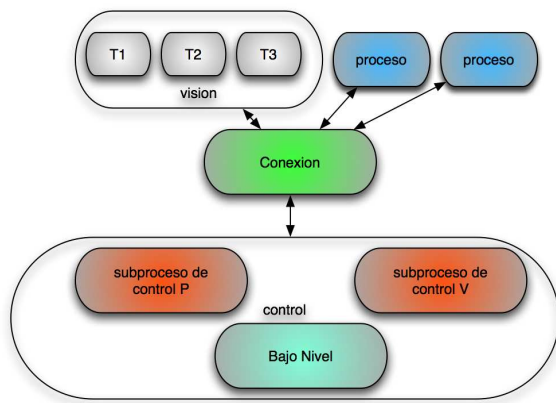


Figura 4: Esquema de procesos. Procesos externos (nivel superior) inter-actúan con el control a través de una capa de conexión

Las funcionalidades básicas de esta capa se definen como:

- Definir un conjunto de mensajes para identificar el tipo de información, así como el destino del mensaje. Mensajes y estructuras de datos son definidas, y luego enviados a la capa de interconexión. Diferentes mensajes son creados para el control de vuelo como: control de velocidad, control de posición, orientación, actitud, estado del helicóptero, etc. Para procesos externos como: tipo de infamación a enviar y recibir, desde y hacia los procesos externos.
- Conmutar y enrutar los mensajes dependiendo del tipo de información contenida. Por ejemplo, la capa puede cambiar entre control de velocidad o posición dependiendo del tipo de mensaje recibido desde un proceso externo. La figura 5 muestra en detalle la capa de interconexión. En ella se muestra como un proceso se comunica con el control de vuelo, en este caso envía referencias de velocidad al control de vuelo (línea roja), simultáneamente este proceso se comunica bidireccionalmente (línea azul) con otro proceso. Esta funcionalidad se extiende a todos los procesos involucrados en una determinada tarea.

5 POSICIONAMIENTO BASADO EN VISIÓN. DEFINICIÓN DE LA TAREA DE CONTROL VISUAL

La tarea del control visual se encarga de alinear el vehículo con respecto a un objetivo basándose solo

en la información visual 2D que extrae de la escena. Se definen principalmente tres maniobras que son controladas visualmente, el control de posición lateral, vertical y longitudinal. Para cada una de estas maniobras se define una configuración y un conjunto de aproximaciones que permiten generar referencias de velocidad basándose en la posición de las características en la imagen. Para una descripción en detalle de como se generan las señales de referencias de velocidad que son enviadas al control de vuelo para realizar el control visual, refiérase a [16].

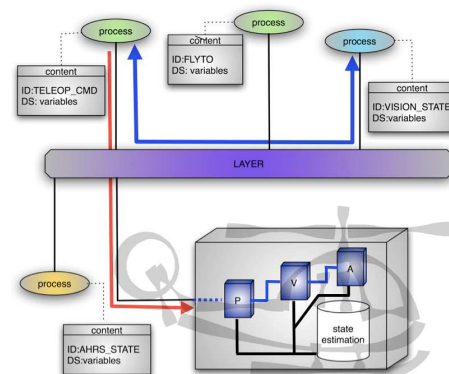


Figura 5: Detalle de la capa de interconexión.

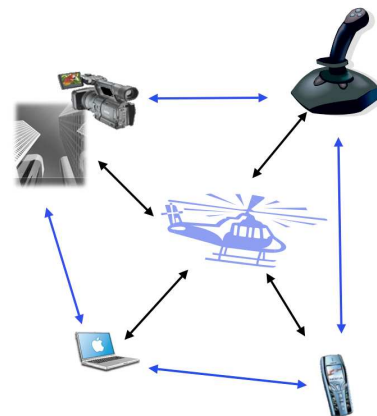


Figura 6: Procesos de diferente naturaleza se integran con el control de vuelo, a la vez que se comunican entre sí.

5.1. Aplicaciones Experimentales

De entre la varias aplicaciones que se han conseguido con esta plataforma se encuentran

1. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos. Con el objetivo de la validar la propuesta de control visual anteriormente mencionada, se ha simulado una inspección sobre una fachada

de un edificio siguiendo visualmente características elegidas por un usuario en tierra.

2. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo. Usando un sistema estereoscopio se consigue calcular la altura y el desplazamiento del sistema detectando y siguiendo puntos salientes en la imagen.
3. Planificación de trayectorias usando splines. Dada una serie de coordenadas GPS, el sistema calcula la trayectoria optima mas adecuada de forma que el UAV visite cada punto siguiendo una ruta continua.
4. Detección y seguimiento de líneas eléctricas de alta tensión. Usando una técnica de detección de segmentos de líneas se encuentran la líneas sobre la imagen, y a continuación el sistema visual busca los objetos de interés o componentes, como aisladores, sobre la línea de manera de inspeccionarlos visualmente.

Algunas de estas aplicaciones y sus resultados más significativos se describen en [17], [18], [19] y [20].

6 CONCLUSIONES

El tema del control y la navegación visual de vehículos aéreos autónomos ha suscitado un importante interés durante los últimos años y sigue motivando en la actualidad la actividad investigadora de una numerosa comunidad científica. Gran parte de esta actividad se ha centrado en el área de control, se han propuesto y desarrollado técnicas para estabilizar y maniobrar helicópteros autónomamente dada una trayectoria de vuelo. Sin embargo el área de control visual de UAV esta en pleno auge y desde años recientes se viene popularizando el uso de vehículos aéreos no tripulados para inspección, monitoreo y vigilancia visual, lo que a su vez ha llevado a los investigadores del área visión por computador ha desarrollar técnicas que, usando la información que el vehículo adquiere a través de sensores visuales, pueda influir sobre la trayectoria o plan de vuelo acorde con el procesamiento visual de la escena. El presente trabajo ha mostrado una estrategia de control visual aplicado a un helicóptero autónomo, con aplicaciones potenciales reales en la industria.

Agradecimientos

El trabajo presentado ha sido financiado por el MCYT bajo proyecto DPI2004-06624 y por la Comunidad de Madrid dentro del proyecto "SLAM visual 3D". Los autores desean agradecer a Jorge

León por el apoyo prestado al realizar las pruebas experimentales.

Referencias

- [1] Altug, E. Vision Based Control of Unmanned Aerial Vehicles with Applications to an Autonomous Four Rotor Helicopter. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania, December 2003.
- [2] Altug, E., Ostrowski, J. P., and Taylor, C. J. Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback. *International Journal of Robotics Research* 24, 5 (May 2005), 329–341.
- [3] Amidi, O. An Autonomous Vision-Guided Helicopter. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1996.
- [4] BEAR. University of California at Berkeley. BErkeley AeRobot Project. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/bear>, 2006.
- [5] Causey, R. S. A lateral vision-based control autopilot for micro air vehicles using a horizon detection approach. Master's thesis, University of Florida. Depart. of Mechanical and Aerospace Engineering, 2003.
- [6] Conway, A. R. Autonomous Control of an Unstable Helicopter Using Carrier Phase GPS Only. PhD thesis, Stanford University, March 1995.
- [7] Gavrillets, V. Autonomous Aerobatic Maneuvering of Miniature Helicopters: Modeling and Control. PhD thesis, School of Aeronautics and Astronautics, June 2003.
- [8] Gavrillets, V., Martinos, I., Mettler, B., and Feron, E. Control logic for automated aerobatic flight of miniature helicopter. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference* (Monterey, CA, USA, August 2002), no. AIAA 2002-4834, AIAA.
- [9] Hrabar, S. E. Vision-Based 3D Navigation for an Autonomous Helicopter. PhD thesis, University of Southern California, Jan 2006.
- [10] Johnson, A., Montgomery, J. F., and Matthies, L. Vision guided landing of an autonomous helicopter in hazardous terrain. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (May 2005), pp. 3977–3982.
- [11] Johnson, W. *Helicopter Theory*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1980.

- [12] Kim, B. S., and Calise, A. J. Nonlinear flight control using neural networks. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 20, 1 (January-February 1997), 26–33.
- [13] Kim, N. Improved Methods in Neural Network-Based Adaptive Output Feedback Control, with Applications to Flight Control. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332, 2003.
- [14] Lee, S. Neural Network based Adaptive and its applications to Aerial Vehicles. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332, April 2001.
- [15] Mahony, R., and Hamel, T. Image-based visual servo control of aerial robotic systems using linear image features. *IEEE Transactions on Robotics* 21, 2 (April 2005), 227–239.
- [16] Mejias, L. Control Visual de un Vehículo Aéreo Autónomo Usando Detección y Seguimiento de Características en Espacios Exteriores. PhD thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- [17] Mejias, L., Roberts, J., Campoy, P., Usher, K., and Corke, P. Two seconds to touchdown. vision-based controlled forced landing. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Beijing, China, October 2006), p. to appear.
- [18] Mejias, L., Saripalli, S., Campoy, P., and Sukhatme, G. Visual servoing approach for tracking features in urban areas using an autonomous helicopter. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Orlando, Florida, May 2006), pp. 2503–2508.
- [19] Mejias, L., Saripalli, S., Campoy, P., and Sukhatme, G. Visual servoing for tracking features in urban areas using an autonomous helicopter. *Journal Of Field Robotics* 23, 3-4 (April 2006), 185–199.
- [20] Mejias, L., Saripalli, S., Sukhatme, G., and Campoy, P. Detection and tracking of external features in a urban environment using an autonomous helicopter. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (May 2005), pp. 3983–3988.
- [21] Merz, T., Duranti, S., and Conte, G. Autonomous landing of an unmanned helicopter based on vision and inertial sensing. In *International Symposium on Experimental Robotics* (Singapore, June 2004).
- [22] Montgomery, J. F. The usc autonomous flying vehicle (afv) project: Year 2000 status. Tech. Rep. IRIS-00-390, Institute for Robotics and Intelligent Systems Technical Report, Los Angeles, CA 90089-0273, 2000.
- [23] Nardi, F. Neural Network based Adaptive Algorithms for Nonlinear Control. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332, November 2000.
- [24] Prouty, R. W. Helicopter Performance, Stability and Control. Robert E. Kreiger Publishing, 1990.
- [25] Saripalli, S., Montgomery, J. F., and Sukhatme, G. S. Visually-guided landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19, 3 (June 2003), 371–381.
- [26] Shakernia, O., Ma, Y., Koo, T. J., and Sastry, S. S. Landing an unmanned air vehicle: vision based motion estimation and nonlinear control. In *Asian Journal of Control* (September 1999), vol. 1, pp. 128–145.
- [27] Shim, H. Hierarchical Flight Control System Synthesis for Rotorcraft-based Un-manned Aerial Vehicles. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2000.
- [28] Sugeno, M., Winston, H., Hirano, I., and S.Kotsu. Intelligent control of an unmanned helicopter based on fuzzy logic. In *American Helicopter Society 51st Annual forum Proceedings* (Houston, May 1995), pp. 791–803.
- [29] UAVRF. Georgia Institute of Technology. UAV Research Facility. <http://controls.ae.gatech.edu/uavrf/> 2006.
- [30] Yue, A., and Postlethwaite, J. Improvement of helicopter handling qualities using hinf optimization. In *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D* (May 1990), vol. 137, pp. 115–129.